

Procédé de détermination de paramètres de fonctionnement d'une installation comprenant une enceinte de refroidissement.

La présente invention est relative à un procédé de détermination de paramètres de fonctionnement d'une installation de refroidissement thermique d'articles.

5 L'invention s'applique notamment aux installations de surgélation d'articles alimentaires.

Les installations connues de surgélation comportent, par exemple, une enceinte ou tunnel, de surgélation traversé de part en part par un convoyeur à bandes sur lequel sont déposés des articles à congeler, le convoyeur circulant en
10 continu ou séquentiellement au travers du tunnel de surgélation.

Une enceinte cryogénique utilise un fluide inerte à basse température qui échange de la chaleur directement par contact avec les articles à surgeler.

De manière classique, une enceinte cryogénique utilise soit la neige carbonique (-80°C), l'air liquide ou l'azote liquide (-196°C) comme vecteur de
15 froid. La neige carbonique permet le transport de produits frais ou surgelés sans crainte de rupture de la chaîne de froid. L'azote et l'air liquide permettent soit la surgélation individualisée de produits alimentaires, soit le durcissement de produits fragiles, déformables ou collants (du type crème glacée ...).

Les paramètres de fonctionnement des installations forment des recettes créées de manière expérimentale. Une recette mémorise les paramètres de
20 réglage d'une installation pour une production donnée.

Il n'existe pas aujourd'hui de capteur capable de mesurer en continu et sans contact, la température interne d'un article, de sorte que la détermination des recettes passe par des procédés de détermination de paramètres de fonc-
25 tionnement qui sont ensuite ajustés à l'aide de tests réalisés en situation, lesquels tests sont le plus souvent destructifs.

Les procédés de détermination de recettes comprennent généralement une étape de détermination d'une consigne portant sur la température de sortie des articles suivie d'une étape de détermination de paramètres de fonc-
30 tionnement initiaux puis la réitération d'un cycle de test comprenant une étape de prédiction de la température de sortie des articles, une étape de comparaison de

la température prédite avec la consigne et, en cas de différence, une étape de modification des paramètres de fonctionnement.

Le cycle de test est renouvelé jusqu'à ce que les paramètres de fonctionnement permettent d'obtenir une température prédite sensiblement proche de
5 la température de consigne.

Il est à noter que toutes ces étapes sont déduites et réalisées par l'opérateur de façon expérimentale, en tenant compte de son savoir faire, son expérience, de ses connaissances.

Si l'on examine le système constitué de l'enceinte et de la charge d'articles, plusieurs paramètres peuvent influencer sur la température de l'article en sortie : le débit de production qui, pour un taux de chargement donné, implique une variation du temps de séjour dans l'enceinte, le débit du fluide qui agit sur le profil des températures, la température d'entrée des articles, le profil convectif de l'enceinte, et le taux de chargement.
10

Le système est donc un système multivariables et les procédés de détermination de paramètres existants, et notamment l'étape de prédiction de la température des articles en sortie, ne prennent pas en compte ces éléments.
15

Dans les étapes de prédiction de l'état de la technique, afin de traiter des systèmes monovariables, on a été amené à considérer le profil convectif et le taux de chargement comme constants, et à fixer le débit de production, la température des articles en entrée de l'enceinte de surgélation ainsi que d'autres paramètres de fonctionnement des installations.
20

De ce fait, les recettes déterminées par les procédés de détermination existants sont relativement imprécises et nécessitent la mise en œuvre d'une production suivie de tests destructifs sur les articles.
25

La présente invention vise à remédier à ce problème en définissant un procédé de détermination de paramètres de fonctionnement, précis et aisément mis en œuvre.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de détermination des paramètres de fonctionnement d'une installation de refroidissement thermique d'articles, comprenant une enceinte traversée par lesdits articles d'une entrée à une sortie et utilisant un fluide de refroidissement, le procédé comprenant :
30

- une étape de détermination d'une consigne de température d'articles en sortie de ladite enceinte ;

- ladite étape de prédiction du comportement desdits articles est réalisée en outre, à partir de paramètres de fonctionnement de ladite installation ;
- lesdits paramètres de fonctionnement de ladite installation comprennent la température desdits articles en entrée de ladite enceinte ;
- 5 - ladite étape de prédiction du comportement desdits articles est optimisée par des calculs de modification dudit maillage desdits articles selon des suites mathématiques ;
- ladite étape de prédiction du comportement desdits articles est optimisée par suppression des calculs de prédiction pour des points spatiaux et temporels dudit maillage desdits articles pour lesquels les variations d'enthalpie sont inférieures à un seuil prédéterminé ;
- 10 - ladite étape de prédiction de la température desdits articles en sortie de ladite enceinte est fondée sur ladite étape de prédiction du comportement de ladite enceinte ainsi que sur ladite étape de prédiction du comportement desdits articles ;
- 15 - ladite étape de modification des paramètres de fonctionnement comprend une étape de modification manuelle d'au moins une partie des paramètres de fonctionnement ;
- ladite étape de modification des paramètres de fonctionnement comprend la modification automatique d'au moins une partie desdits paramètres de fonctionnement ; et
- 20 - ladite étape de modification des paramètres de fonctionnement comprend la modification d'au moins un des paramètres choisis par le groupe consistant en :
 - 25 - le débit dudit fluide de refroidissement ;
 - le temps de séjour desdits articles dans ladite enceinte ;
 - le débit de gaz extrait de ladite enceinte ;
 - la mise en vitesse des gaz ;
 - la recirculation des gaz ; et
 - 30 - la balance entre les entrées d'air et les sorties de gaz.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés, sur lesquels :

- une étape de détermination de paramètres de fonctionnement initiaux pour ladite installation ; et
 - un cycle de test des paramètres de fonctionnement comprenant :
 - une étape de prédiction de la température d'articles en sortie de
- 5 ladite enceinte ;
- une étape de comparaison de la température de consigne avec la température prédite ; et
 - si ladite étape de comparaison révèle un écart supérieur à un seuil prédéterminé, une étape de modifications de paramètres de fonctionnement
- 10 de ladite installation et une réitération du cycle de test,
- ladite étape de prédiction étant réalisée à partir de paramètres de fonctionnement de ladite enceinte, de caractéristiques thermodynamiques et physiques de ladite enceinte et de caractéristiques thermodynamiques et physiques desdits articles.
- 15 Suivant d'autres caractéristiques :
- ladite étape de prédiction comporte une étape de prédiction du comportement de ladite enceinte fondée sur la résolution de bilans thermiques sur des tranches élémentaires du volume de ladite enceinte, réalisée au moins à partir de caractéristiques thermodynamiques dudit fluide de refroidissement et de
- 20 caractéristiques thermodynamiques et physiques de ladite enceinte ;
- ladite étape de prédiction du comportement de ladite enceinte est réalisée en outre, à partir de paramètres de fonctionnement de ladite installation ;
 - lesdits paramètres de fonctionnement de ladite installation représentent au moins l'un des éléments choisis dans le groupe consistant en :
- 25 - la vitesse d'un convoyeur de transport desdits articles au travers de ladite enceinte ;
- le taux de chargement ; et
 - la ventilation de l'atmosphère de ladite enceinte ;
- ladite étape de prédiction comporte une étape de prédiction du com-
- 30 portement desdits articles fondée sur la résolution de l'équation de conservation de la chaleur discrétisée et appliquée à un réseau de points spatiaux et temporels constituant un maillage desdits articles, réalisée au moins à partir de caractéristiques thermodynamiques et physiques desdits articles ;

- la Fig.1 représente un schéma synoptique illustrant une installation de refroidissement ;

- la Fig.2 est un organigramme général du procédé de l'invention ;

- la Fig.3 illustre la modélisation numérique des articles à traiter ;

5 - la Fig.4 illustre la modélisation numérique de l'enceinte de refroidissement ; et

- la Fig.5 représente l'organigramme détaillé du cycle de test du procédé de l'invention.

10 Sur la figure 1, on a représenté une installation classique de traitement d'articles alimentaires, pour laquelle des paramètres de fonctionnement sont déterminés par un procédé selon l'invention.

Cette installation comprend une enceinte ou tunnel cryogénique 2, de type classique, permettant la congélation d'articles alimentaires P par leur mise en présence avec un fluide cryogénique 4 véhiculé par une ligne d'alimentation 5,
15 à partir d'une source quelconque.

Par exemple, l'enceinte 2 a une forme de parallélépipède rectangle.

Comme cela est dit précédemment, le fluide cryogénique 4 utilisé peut être par exemple, de la neige carbonique ou de l'azote liquide et est injecté en un ou plusieurs endroits de l'enceinte 2.

20 Cette enceinte 2 est associée à un convoyeur 6 de type classique, permettant l'introduction des articles P dans l'enceinte 2 et leur extraction et fonctionnant soit de manière séquentielle, soit de manière continue.

L'installation présente plusieurs paramètres de fonctionnement, à savoir le profil des températures dans l'enceinte, le temps de séjour des articles P
25 dans l'enceinte 2 ou la vitesse de déroulement du convoyeur 6, et la température d'entrée des articles P.

L'installation comporte enfin des moyens de commande 12 de la quantité de fluide cryogénique 4 injectée dans l'enceinte 2.

Ces moyens 12 comportent des moyens de pilotage 14 du débit de
30 fluide cryogénique 4. Par exemple, les moyens de pilotage 14 sont constitués par des systèmes d'électrovannes ou des vannes proportionnelles de type classique, disposés sur la ligne d'alimentation 5 en fluide cryogénique 4.

Avantageusement, l'installation comporte également un système de ventilation de gaz contrôlant les flux de gaz et la ventilation de l'atmosphère de l'enceinte 2.

Par exemple, ce système est composé de ventilateurs spécifiques permettant la mise en vitesse des gaz, de ventilateurs contrôlant la recirculation des gaz et d'une combinaison entre des ventilateurs et des portes mobiles contrôlant la balance entre les entrées d'air et les sorties de gaz.

En référence à la figure 2, on va maintenant décrire un organigramme général du procédé de détermination des paramètres de fonctionnement selon l'invention.

Ce procédé débute par une étape 16 de saisie d'une consigne portant sur la température de sortie des articles après refroidissement thermique.

L'étape 16 est suivie d'une étape 18 de détermination des paramètres de fonctionnement initiaux. Les paramètres déterminés au cours de cette étape 18 sont des paramètres connus tels que les caractéristiques mécaniques de l'enceinte 2 ou encore les caractéristiques physiques et thermodynamiques des articles P et des paramètres variables, tels que les paramètres de fonctionnement de l'installation qui sont fixés arbitrairement.

Le procédé comporte ensuite une étape 20 de prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2.

Cette étape 20 comporte une étape 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 2 et une étape 24 de prédiction du comportement des articles P.

L'étape 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 2, permet de prédire par calcul ainsi que cela est décrit plus loin en référence à la figure 4, le profil théorique des températures du fluide cryogénique à l'intérieur de l'enceinte 2.

Les résultats délivrés par l'étape 22 dépendent des caractéristiques thermodynamiques du fluide cryogénique 4, des caractéristiques convectives de l'enceinte 2 ainsi que les caractéristiques des moyens d'injection du fluide cryogénique 4, des caractéristiques du système de ventilation et des caractéristiques physiques de l'enceinte 2.

L'étape 22 prend également en compte des paramètres de fonctionnement de l'installation comme la vitesse du convoyeur 6.

L'étape 24 de prédiction du comportement des articles P permet de déterminer par calcul, ainsi que cela est décrit plus loin en référence à la figure 3, des variations d'enthalpie des articles P en fonction de leur environnement extérieur et de leur température initiale.

5 Ainsi, les résultats délivrés par l'étape 24 de prédiction du comportement des articles P, dépendent de leurs caractéristiques physiques et thermodynamiques.

 Les étapes 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 24 et de prédiction du comportement des articles P, sont couplées l'une à l'autre ainsi que
10 cela est décrit plus en détail en référence à la figure 5, afin de délivrer une température théorique des articles P en sortie de l'enceinte 2.

 Ainsi, la prédiction réalisée au cours de l'étape 20 de prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2 prend en compte les caractéristiques thermodynamiques et physiques de l'enceinte 2 et des articles P, ainsi
15 que les paramètres de fonctionnement de l'installation.

 De ce fait, la détermination de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2 est dynamique, paramétrable et d'une grande précision.

 L'étape 20 de prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2 est suivie d'une étape 26 de comparaison de la température prédite
20 lors de l'étape 20, avec la consigne de température déterminée lors de l'étape 16.

 Par exemple, cette étape 26 de comparaison permet la prise en compte d'un intervalle de tolérance de l'ordre de quelques degrés autour de la consigne de température de sortie déterminée lors de l'étape 16.

 Quand l'écart entre la température prédite et la consigne est supérieur
25 à un seuil prédéterminé, l'étape 26 de comparaison est suivie d'une étape 28 de modification de paramètres de fonctionnement de l'installation.

 Par exemple, les paramètres de fonctionnement modifiés au cours de cette étape 28, comprennent la vitesse du convoyeur 6 et les paramètres intervenant dans la détermination du profil théorique des températures du fluide 4 dans
30 l'enceinte 2, soit par exemple le débit du fluide cryogénique 4, le contrôle de la ventilation à l'intérieur de l'enceinte 2 et le taux de chargement du convoyeur 6.

 Les modifications des paramètres de fonctionnement en cours de l'étape 28 peuvent être réalisées directement par un opérateur ou être faites de

manière automatique par un ordinateur prenant en compte des limites maximale et minimale pour chacun des paramètres.

De plus, les modifications peuvent affecter un ou plusieurs paramètres à chaque fois.

5 Il est également possible de définir un ordre de modification des paramètres de fonctionnement pour tenter d'atteindre la température de consigne en ne modifiant qu'un paramètre à la fois. Si la consigne ne peut être atteinte en modifiant un premier paramètre entre des valeurs limites. Ce paramètre est fixé sur une valeur limite ou une valeur moyenne et aux itérations suivantes, le paramètre suivant dans la liste est modifié.

10 A l'issue de l'étape 28 de modification des paramètres de fonctionnement, le procédé reprend à l'étape 20 de prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2, le procédé formant ainsi un cycle de test des paramètres de fonctionnement de l'installation, comprenant l'étape 20 de prédiction de la température des articles en sortie, l'étape 26 de comparaison de la température prédite avec la température de consigne et l'étape 28 de modification des paramètres de fonctionnement.

20 Ce cycle de test, désigné par la référence numérique générale 29, est répété jusqu'à ce que la comparaison effectuée lors de l'étape 26 entre la température prédite et la température de consigne révèle à un écart inférieur à une valeur de seuil prédéterminée.

Le cycle 29 est alors interrompu et l'étape 26 est suivie d'une étape 30 d'enregistrement des derniers paramètres de fonctionnement testés, qui forment ainsi une recette.

25 La prédiction réalisée au cours de l'étape 20 étant d'une grande précision et prenant en compte des paramètres de fonctionnement de l'enceinte 2, des caractéristiques thermodynamiques et physiques de l'enceinte 2 et des caractéristiques thermodynamiques et physiques de l'article P, la recette déterminée par le procédé de l'invention est précise et proche du fonctionnement réel.

30 De plus, une telle recette est facilement adaptée à des modifications des conditions de fonctionnement.

Par exemple, si un paramètre de fonctionnement tel que la température d'entrée des articles dans l'enceinte 2 est modifié, la recette peut être corrigée par l'exécution du procédé de l'invention en utilisant les paramètres actuels de

recette comme paramètres de fonctionnement initiaux lors de l'étape 18, l'exécution du procédé de l'invention permettant de déterminer rapidement et simplement les corrections à apporter aux paramètres de fonctionnement pour obtenir la bonne température de sortie des articles P.

5 En référence aux figures 3, 4 et 5, on va maintenant décrire plus en détail l'étape 20 de prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2.

Sur la figure 3, on a représenté un exemple de maillage d'un article alimentaire P tel que mis en œuvre au cours de l'étape 24 de prédiction du comportement des articles P.

La prise en compte, dans le procédé de détermination de paramètres de fonctionnement, des caractéristiques thermodynamiques et physiques des articles P lors de l'étape 24 de prédiction de leur comportement, est basée sur une modélisation des articles P à laquelle est appliquée l'équation de conservation de la chaleur discrétisée.

En effet, l'équation de la conservation de la chaleur ne peut pas être résolue en tout point de l'espace et en tout instant, par une fonction intégrale simple.

La méthode employée consiste à discrétiser cette équation de sorte que l'on ne la résout plus que sur des points spatiaux et temporels appelés nœuds et désignés par la référence numérique générale 32.

Après définition d'un maillage de l'article P, on applique l'équation de conservation de la chaleur à chacun des nœuds 32.

On obtient ainsi un système d'équation qu'il faut résoudre pour connaître l'état thermique de l'article P dans le temps et dans l'espace.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial (C.T)}{\partial t}$$

X, Y et Z sont des axes définissant un repère spatial orthonormé autour de l'article P. T est la température de l'article P exprimée en kelvin (K), et C sa chaleur spécifique exprimée en watt par kilogramme et par kelvin (W/(Kg*K)).

30 Les articles alimentaires P que l'on surgèle sont généralement constitués de corps différents.

Cela signifie que le changement de phase s'accompagne d'une variation de température et que l'équation de la conservation de la chaleur peut toujours s'appliquer.

En revanche, si l'on est amené à traiter un corps pur, l'équation n'est plus continue. Dans ce cas, on simplifie le problème en modifiant la table d'enthalpie du corps pur pour que le changement de phase engendre une faible variation de température.

La discrétisation est faite grâce à la méthode mathématique des différences finies en régime variable.

De manière connue, celle-ci peut être effectuée de deux manières.

La première, la discrétisation implicite, a l'avantage d'être stable quelle que soit la configuration spatiale et temporelle. A un instant donné, elle permet de déterminer la température d'un nœud 32 en fonction de la température des nœuds voisins au même instant. Elle implique cependant des conditions aux frontières constantes et une résolution matricielle du système d'équation formé par chacun des nœuds 32.

La seconde, la discrétisation explicite, permet de déterminer directement le température d'un nœud 32 à un instant $T+\Delta T$ d'après les conditions à l'instant T . Le résultat est immédiat, en revanche, il faut choisir un pas de temps adapté de manière à éviter l'instabilité du modèle.

La première méthode est préconisée dans le cas où l'on cherche à obtenir principalement la température de surface d'un article, ce qui correspond à l'opération communément appelée opération de « croûtage ». La seconde est préconisée lorsque l'on veut faire de la surgélation et connaître la température à cœur d'un article.

Le maillage de l'article P est un problème crucial. De cela dépend directement la simplicité du traitement ultérieur et la précision des résultats.

Un nombre de nœuds important amène une grande précision dans le résultat mais impose un temps de calcul élevé. Il s'agit de trouver un compromis entre la précision et le temps de calcul.

Par exemple, pour le cas d'un produit alimentaire de dimensions extérieures 100 x 60 x 10 mm avec un maillage régulier tous les millimètres, il faut plus de 17000 nœuds et autant d'équations pour définir le comportement de l'article P.

Dans la version décrite de l'invention, l'étape 24 comporte des calculs qui permettent d'optimiser le maillage qui est effectué pour la prédiction du comportement des produits P.

Par exemple, dans le cas du croûtage, on surveille plus particulièrement la solidification d'une fine épaisseur de la peau du produit par changement de phase. Il faut donc un maillage dense en périphérie et plus large à cœur.

Pour ne pas saisir manuellement les coordonnées de chacun des nœuds et pour conserver des relations simples entre les nœuds et faciliter le traitement, une solution consiste à distribuer des nœuds dans chaque direction de l'espace à l'aide par exemple d'une progression géométrique, comme cela est représenté sur la figure 3.

Par exemple, sur l'axe X, on distribue les nœuds de la manière suivante : on considère Δx la valeur du premier terme qui correspond à l'abscisse du premier nœud, et r la raison, différente de 1, de la suite géométrique mis en œuvre. La valeur du $n^{\text{ème}}$ terme est : $\Delta x \cdot r^{n-1}$, cela correspond à la position sur l'axe X du $n^{\text{ème}}$ nœud. La somme des n premiers termes est :

$$S = \Delta x + \frac{1-r^n}{1-r}$$

La figure 3 représente le positionnement des nœuds selon ce maillage sur un article P parallélépipédique où l'on a imposé une condition de parité sur le nombre de nœuds de manière à simplifier la résolution.

On obtient ainsi une valeur correspondant à la dimension du produit P selon l'axe X :

$$L_p = \Delta x + \Delta x \left(1 + r \right) \frac{1-r^n}{1-r} = \Delta x \left(1 + \frac{1}{R} (1-r^n) \right)$$

$$\text{avec } R = \frac{1-r}{1+r}$$

Avec l qui correspond à l'abscisse du nœud central sur cette longueur :

$$l = \frac{Ln \left(1 - \left(\frac{L_p}{\Delta x} - 1 \right) R \right)}{Ln(r)}$$

L'imprécision sur l'axe X s'exprime alors de la manière suivante :

$$-1/2 \leq l - \frac{Ln \left(1 - \left(\frac{L_p}{\Delta x} - 1 \right) R \right)}{Ln(r')} < 1/2 \quad \Leftrightarrow \quad L_p - \frac{\Delta x}{R} r'^{\frac{1}{2}} \left(r'^{-\frac{1}{2}} - 1 \right) \leq \Delta x \left(1 + \frac{1}{R} (1 - r') \right) < L_p + \frac{\Delta x}{R} r'^{\frac{1}{2}} \left(r'^{\frac{1}{2}} - 1 \right)$$

Pour aboutir à des calculs simples on fixe les imprécisions sur les trois axes à une même valeur. Cela induit une erreur sur les dimensions du produit P qui est acceptable dans le cas où l'on s'intéresse uniquement aux températures sur une faible épaisseur de peau et que les températures à cœur varient peu, comme cela est le cas dans les opérations de croûtage.

Dans le cas des opérations de surgélation où l'on cherche à déterminer la température à cœur du produit, un terme correctif peut être inséré dans les formules. Dans le cas de l'axe X, on insère le terme correctif suivant :

$$\Delta x' = \frac{L_p}{\left(1 + \frac{1}{R} (1 - r') \right)}$$

Une autre méthode d'optimisation possible consiste à diminuer le temps de traitement en omettant certains calculs.

En effet, sur chaque nœud, on additionne le flux thermique aux six faces de son volume élémentaire. Cependant, il existe des zones où les effets thermiques sont assimilables à des problèmes monodimensionnels.

Pour exploiter cette particularité, on décompose le traitement en sommant non plus globalement les flux thermiques sur chaque face, mais selon chaque direction. Sur chaque direction, on résout, pour un pas de temps ΔT , les équations aux nœuds en allant de la frontière vers le cœur, jusqu'à ce que la variation d'enthalpie soit considérée comme étant négligeable car inférieure à un seuil prédéterminé.

En effectuant cette opération dans chaque direction, on définit un volume du produit P englobant tous les nœuds pour lesquels les variations d'enthalpie seront négligeables, et donc pour lesquels aucun calcul ne sera fait.

On peut ainsi économiser du temps de calcul, surtout dans les premiers instants de l'échange.

Dans le cas où l'article P est de forme complexe, on peut le décomposer en un ensemble de formes élémentaires auxquelles on applique le maillage défini ci-dessus ou tout autre maillage adapté à la forme de l'article P.

Sur la figure 4, on a représenté schématiquement l'enceinte de traitement 2 des articles alimentaires P telle que modélisée pour la mise en œuvre de l'étape 22 de prédiction de son comportement.

La prise en compte, dans le procédé de détermination des conditions de fonctionnement, des caractéristiques thermodynamiques et physiques de l'enceinte 2 lors de l'étape 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 2, est basée sur sa modélisation sous forme de tranches élémentaires.

Comme cela a été décrit précédemment en référence à la figure 1, l'enceinte 2 de refroidissement est associée à un convoyeur 6. Elle est alimentée en fluide cryogénique 4 via à une ligne d'alimentation 5. L'enceinte 2 est assimilée à un parallélépipède rectangle.

Pour déterminer le profil théorique des températures du fluide 4, la méthode mise en œuvre pour la prédiction du comportement de l'enceinte 2 consiste à effectuer une succession de bilans thermiques locaux.

Dans ce but, on considère une modélisation du système thermodynamique de l'enceinte 2, en régime établi, sous la forme de tranches élémentaires 34_1 à 34_n , perpendiculaires à sa longueur. La somme de ces tranches élémentaires 34_1 à 34_n , représente le volume interne de l'enceinte 2.

Pour chaque tranche élémentaire 34_1 à 34_n , on effectue le bilan des transferts thermiques afin de déterminer l'enthalpie du fluide 4 et donc sa température.

Ce bilan doit tenir compte :

- des déperditions thermiques avec l'extérieur de l'enceinte 2 ;
- du liquide cryogénique 4 injecté dans les zones de pulvérisation ; et
- des échanges entre les produits P et le fluide 4.

Dans le cas de la tranche 34_i de l'enceinte 2 de dimensions $L \cdot l \cdot h$, le bilan thermique se traduit par l'équation suivante :

$$H_{fs(i)} = H_{fe(i)} + \frac{2K_r(l+h)(T_{Amb} - T_{fe(i)})\Delta X - \Delta \dot{m}_{fspray(i)} * (H_{fe(i)} - H_{fLiq}) + \dot{m}_p (H_{pe(i)} - H_{ps(i)})}{\dot{m}_{fe(i)} + \Delta \dot{m}_{fspray(i)}}$$

Dans cette équation :

$H_{fs(i)}$ correspond à l'enthalpie du fluide cryogénique 4 en sortie de la tranche élémentaire 34_i exprimé en joules par kilogramme (J/Kg) ;

$H_{fe(i)}$ correspond à l'enthalpie du fluide cryogénique 4 en entrée de la tranche élémentaire 34_i exprimée en joules par kilogramme (J/Kg) ;

H_{fLiq} correspond à l'enthalpie liquide du fluide cryogénique 4 injecté exprimée en joules par kilogramme (J/Kg) ;

5 $H_{pe(i)}$ correspond à l'enthalpie de l'article P en entrée de la tranche 34_i exprimée en joules par kilogramme (J/Kg) ;

$H_{ps(i)}$ correspond à l'enthalpie de l'article P en sortie de la tranche 34_i exprimée en joules par kilogramme (J/Kg) ;

10 K_T correspond au coefficient d'échange thermique de l'enceinte 2 avec l'extérieur exprimé en watt par mètre carré et par kelvin (W/(m²K)) ;

$\dot{m}_{fSpray(i)}$ correspond au débit massique de fluide cryogénique 4 vaporisé dans la tranche 34_i exprimé en kilogramme par seconde (Kg/s) ;

$\dot{m}_{fe(i)}$ correspond au débit massique de fluide cryogénique 4 entrant dans la tranche 34_i exprimé en kilogramme par seconde (Kg/s) ;

15 \dot{m}_p correspond au débit massique de produits à traiter exprimé en kilogramme par seconde (Kg/s) ;

T_{Amb} correspond à la température ambiante exprimée en kelvin ; et

$T_{fe(i)}$ correspond à la température du fluide cryogénique 4 en entrée de la tranche 34_i exprimée en kelvin.

20 Sur la figure 4 on a également représenté les flux thermiques :

$\dot{m}_{fSpray(i)} H_{fLiq}$ est représenté par la lettre A ;

$\dot{m}_{fe(i)} H_{fe(i)}$ est représenté par la lettre B ;

$\dot{m}_{fs(i)} H_{fs(i)}$ est représenté par la lettre C ;

$\dot{m}_p H_{pe(i)}$ est représenté par la lettre D ; et

25 $\dot{m}_p H_{ps(i)}$ est représenté par la lettre E ;

avec $\dot{m}_{fs(i)} = \dot{m}_{fe(i)} + \Delta \dot{m}_{fSpray(i)}$

Par expérience, on sait que dans certaines conditions de fonctionnement (débit de production trop faible ou température du fluide cryogénique 4 trop

basse), le liquide cryogénique 4 injecté n'est que partiellement vaporisé et une fraction du liquide s'écoule vers l'entrée de l'enceinte 2.

Si l'on souhaite prendre en compte ce phénomène, il est préférable de résoudre les bilans locaux en commençant par la tranche élémentaire située en sortie de l'enceinte 2. On fait donc les calculs dans le sens inverse du trajet des articles P, soit selon l'axe X tel que représenté sur la figure 4.

Dans ce sens en effet, on peut reporter la fraction de liquide non vaporisé dans la suivante et ainsi de suite jusqu'à atteindre les zones de ventilation où les débits injectés sont nuls et où les surplus liquides sont vaporisés.

Pour déterminer la fraction de liquide cryogénique 4 non vaporisé dans une tranche élémentaire, on désigne une enthalpie du fluide limite, en-dessous de laquelle apparaîtra un titre liquide.

Cela revient à fixer une température de fluide gazeux minimale dans l'enceinte 2.

Le titre liquide non vaporisé en sortie de la tranche élémentaire 34, correspond à $x_{L(i)}$ et s'exprime sous la forme suivante :

$$x_{L(i)} = \frac{\dot{m}_{fLiq(i)}}{\dot{m}_{fs(i)}}$$

Si on simplifie les calculs en considérant que l'enthalpie de cette fraction liquide est sensiblement égale à l'enthalpie du fluide cryogénique 4 injecté, on obtient l'expression du titre du liquide suivante :

$$x_L = \frac{(H_{fLim} - H_{fs})}{(H_{fLim} - H_{fLiq})}$$

Dans cette équation, H_{fLim} correspond à l'enthalpie limite de formation d'un titre liquide dans une tranche élémentaire de l'enceinte 2.

Sur la figure 5, on a représenté le détail du cycle de test 29 et notamment de l'étape 20 de prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2.

Afin de pouvoir réaliser une prédiction de la température des articles P en sortie de l'enceinte 2, le procédé de refroidissement fait intervenir l'étape 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 2 et l'étape 24 de prédiction du comportement des articles P.

On commence par réaliser l'étape 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 2, lors d'une étape 40.

Cette étape 40 délivre les pertes thermiques 42 par tranche élémentaire, qui sont réintroduites dans l'étape 22.

5 Après avoir réitéré cette opération un certain nombre de fois, on obtient les pertes thermiques totales 44 ainsi que le profil 46 des températures du fluide 4 dans l'enceinte 2, lors de l'étape 40.

Pour calculer le bilan thermique de chaque tranche, l'étape 22 requiert les variations enthalpiques des articles P. De fait, lors de la première itération, le
10 profil des températures du fluide 4 dans l'enceinte 2 ne pouvant pas être calculé, il est fixé arbitrairement.

On met ensuite en œuvre l'étape 24 de prédiction du comportement des articles P, lors d'une étape 50. Cette étape 50 délivre l'enthalpie 52 de l'article P en sortie de l'enceinte 2, soit sa température.

15 Eventuellement, l'étape 24 de prédiction du comportement des articles P délivre également les variations enthalpiques 54 d'un article P pour chaque tranche élémentaire de l'enceinte 2. Dans ce cas, cette information est retournée à l'étape 22 de prédiction de comportement de l'enceinte 2, qui l'insère dans le bilan thermique de chaque tranche élémentaire.

20 L'enthalpie 52 de l'article P en sortie de l'enceinte 2 ainsi que le profil 46 des températures du fluide 4 dans l'enceinte 2 et les pertes thermiques totales 44, sont mis en relation afin de déterminer le débit total du fluide, à l'étape 60.

Eventuellement, on obtient également le débit 62 injecté dans chaque tranche élémentaire. Dans ce cas, cette information est retournée à l'étape 22 de
25 prédiction du comportement de l'enceinte 2, qui l'insère dans le bilan thermique de chaque tranche élémentaire.

On vérifie ensuite si le profil des températures du fluide 4 dans l'enceinte 2 est stable, à l'étape 70.

Par exemple, le profil des températures du fluide est considéré comme
30 stable s'il répond deux fois de suite au critère suivant :

$$\frac{H_{ps(1,k)} - H_{ps(1,k-1)}}{H_{ps(1,k)}} \leq dif_profil$$

Dans cette équation, *dif_profil* est une constante fixée par l'opérateur.

Au premier passage, le profil est considéré comme instable.

Tant que le profil est considéré comme instable, on retourne à l'étape 40 et on recommence la succession d'opérations permettant de définir un profil.

Une fois qu'un profil stable a été obtenu, on vérifie lors de l'étape 26, si la consigne déterminée lors de l'étape 26 et portant sur la température des articles P en sortie de l'enceinte 2 a été atteinte.

Si la consigne a été atteinte, les paramètres de fonctionnement aboutissant au dernier profil des températures du fluide 4 à l'intérieur de l'enceinte 2 sont enregistrés lors de l'étape 30 et forment une recette.

Si la consigne n'a pas été atteinte, à l'étape 28 les paramètres de fonctionnement de l'installation sont modifiés. Par exemple, cette modification comporte une correction 102 sur le débit du fluide 4 avant de réitérer l'algorithme. Eventuellement, la modification comporte une correction 104 directement sur les paramètres de fonctionnement conditionnant le profil des températures du fluide 4, qui est utilisée à l'étape 22 de prédiction du comportement de l'enceinte 2.

Dans cet exemple, la prédiction de la température des articles en sortie de l'enceinte est utilisée pour déterminer le débit du fluide 4 injecté dans une enceinte cryogénique 2.

On peut de la même manière influencer sur le temps de séjour des articles P dans l'enceinte 2 en modifiant la vitesse du convoyeur 6 ou les temps d'arrêt dans le cas d'un convoyeur séquentiel. On peut également agir sur la vitesse d'extraction des gaz ou sur le taux de chargement, ou sur une combinaison de ces paramètres.

De même, il est possible d'influer sur la balance entre les entrées d'air et les sorties de gaz, la vitesse d'extraction des gaz, la mise en vitesse des gaz, ou encore la recirculation des gaz en influant sur les éléments de contrôle de ces paramètres.

Par ailleurs, si on met en œuvre le procédé de l'invention pour une installation disposant de capteurs sans contact de la température des articles en sortie, par exemple des capteurs basés sur le rayonnement thermique ou l'image infrarouge, ou encore sur une mesure par thermométrie micro-onde (TMO), tel que le capteur décrit dans le brevet FR-A-2 771 552, les résultats délivrés lors de l'étape de prédiction de la température des articles en sortie de l'enceinte peuvent alors être recoupés avec les mesures délivrées par ces capteurs.

Dans ce cas, on utilise l'une ou l'autre des informations pour vérifier l'autre.

Dans un autre mode de réalisation, l'information délivrée par le capteur est utilisée pour corriger la prédiction.

- 5 Bien qu'un mode particulier de réalisation ait été décrit, il n'est pas considéré comme limitatif de la portée de la présente invention.

En variante, le procédé de refroidissement de l'invention peut aussi être appliqué dans une installation de froid mécanique présentant un dispositif d'échange de chaleur indirect.

- 10 L'invention a été décrite dans le cas du refroidissement d'articles alimentaires, cependant on peut l'appliquer également à d'autres types d'articles notamment métalliques.

- De plus, le terme refroidissement couvre également les systèmes visant au maintien et au contrôle d'une température inférieure à la température initiale d'un article.
- 15

Le procédé de l'invention peut être mis en œuvre à l'aide par exemple d'un programme exécuté sur un ordinateur ou encore toute autre solution logicielle et/ou matérielle adaptée.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de détermination des paramètres de fonctionnement d'une installation de refroidissement thermique d'articles (P), comprenant une enceinte (2) traversée par lesdits articles (P) d'une entrée à une sortie et utilisant un fluide de refroidissement (4), le procédé comprenant :

- une étape (16) de détermination d'une consigne de température d'articles (P) en sortie de ladite enceinte (2) ;
- une étape (18) de détermination de paramètres de fonctionnement initiaux pour ladite installation ; et
- 10 - un cycle (29) de test des paramètres de fonctionnement comprenant :
 - une étape (20) de prédiction de la température d'articles (P) en sortie de ladite enceinte (2) ;
 - une étape (26) de comparaison de la température de consigne
 - 15 avec la température prédite ; et
 - si ladite étape (26) de comparaison révèle un écart supérieur à un seuil prédéterminé, une étape (28) de modifications de paramètres de fonctionnement de ladite installation (2) et une répétition du cycle de test, ladite étape (20) de prédiction étant réalisée à partir de paramètres de
 - 20 fonctionnement de ladite enceinte (2), de caractéristiques thermodynamiques et physiques de ladite enceinte (2) et de caractéristiques thermodynamiques et physiques desdits articles (P).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite étape (20) de prédiction comporte une étape (22) de prédiction du comportement de ladite enceinte (2) fondée sur la résolution de bilans thermiques sur des tranches élémentaires du volume de ladite enceinte (2), réalisée au moins à partir de caractéristiques thermodynamiques dudit fluide de refroidissement (4) et de caractéristiques thermodynamiques et physiques de ladite enceinte (2).

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que ladite étape (22) de prédiction du comportement de ladite enceinte (2) est réalisée en outre, à partir de paramètres de fonctionnement de ladite installation.

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que lesdits paramètres de fonctionnement de ladite installation représentent au moins l'un des éléments choisis dans le groupe consistant en :

- la vitesse d'un convoyeur (6) de transport desdits articles (P) au travers de ladite enceinte (2) ;

- le taux de chargement ; et

- la ventilation de l'atmosphère de ladite enceinte (2).

5 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite étape (20) de prédiction comporte une étape (24) de prédiction du comportement desdits articles (P) fondée sur la résolution de l'équation de conservation de la chaleur discrétisée et appliquée à un réseau de points spatiaux et temporels constituant un maillage desdits articles (P), réalisée au moins à
10 partir de caractéristiques thermodynamiques et physiques desdits articles (P).

6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que ladite étape (24) de prédiction du comportement desdits articles (P) est réalisée en outre, à partir de paramètres de fonctionnement de ladite installation.

15 7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que lesdits paramètres de fonctionnement de ladite installation comprennent la température desdits articles (P) en entrée de ladite enceinte (2).

20 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, caractérisé en ce que ladite étape (24) de prédiction du comportement desdits articles (P) est optimisée par des calculs de modification dudit maillage desdits articles (P) selon des suites mathématiques.

25 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisé en ce que ladite étape (24) de prédiction du comportement desdits articles (P) est optimisée par suppression des calculs de prédiction pour des points spatiaux et temporels dudit maillage desdits articles (P) pour lesquels les variations d'enthalpie sont inférieures à un seuil prédéterminé.

30 10. Procédé selon les revendications 2 et 5 prises ensembles, caractérisée en ce que ladite étape (20) de prédiction de la température desdits articles (P) en sortie de ladite enceinte (2) est fondée sur ladite étape (22) de prédiction du comportement de ladite enceinte (2) ainsi que sur ladite étape (24) de prédiction du comportement desdits articles (P).

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que ladite étape (28) de modification des paramètres de fonctionnement comprend une étape de modification manuelle d'au moins une partie des paramètres de fonctionnement.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que ladite étape (28) de modification des paramètres de fonctionnement comprend la modification automatique d'au moins une partie desdits paramètres de fonctionnement.

5 13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que ladite étape (28) de modification des paramètres de fonctionnement comprend la modification d'au moins un des paramètres choisis par le groupe consistant en :

- 10
- le débit dudit fluide de refroidissement (4) ;
 - le temps de séjour desdits articles (P) dans ladite enceinte (2) ;
 - le débit de gaz extrait de ladite enceinte (2) ;
 - la mise en vitesse des gaz ;
 - la recirculation des gaz ; et
 - la balance entre les entrées d'air et les sorties de gaz.

THIS PAGE BLANK (USPTO)

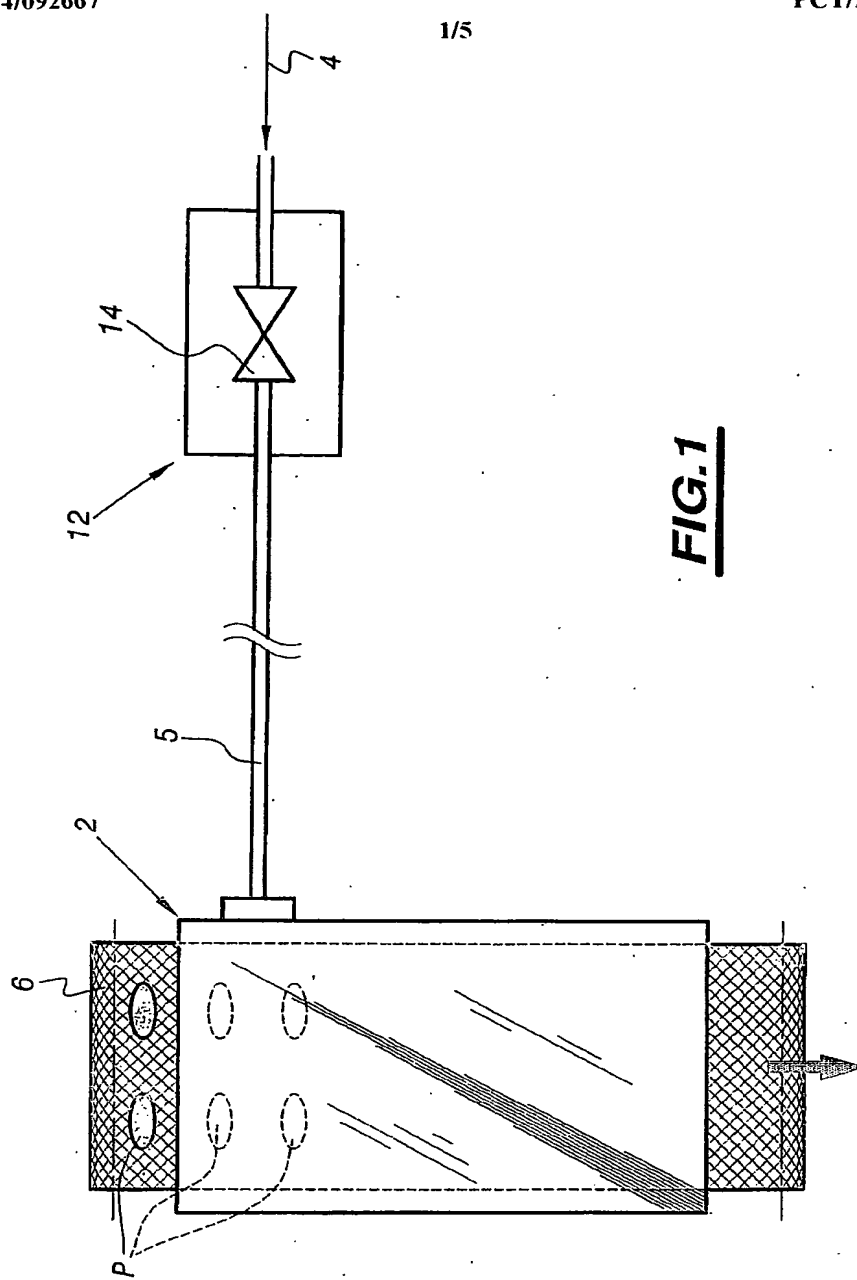
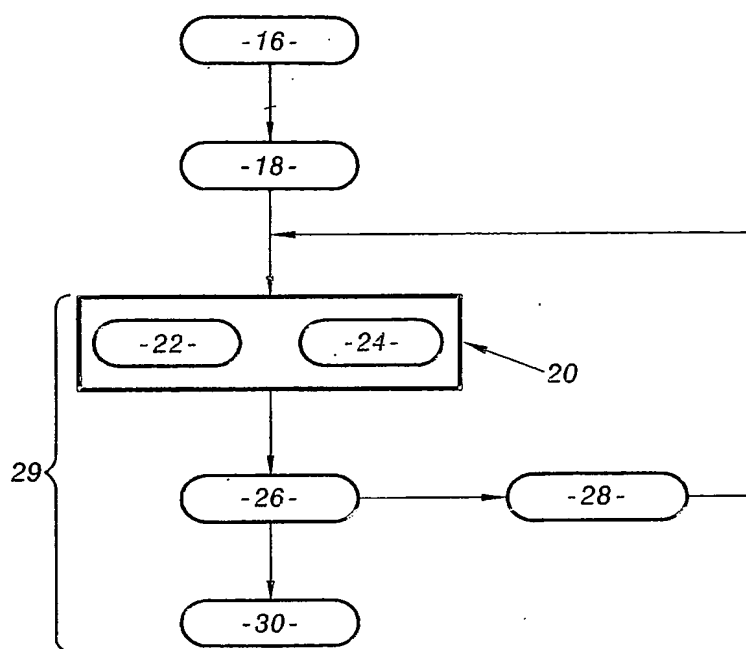
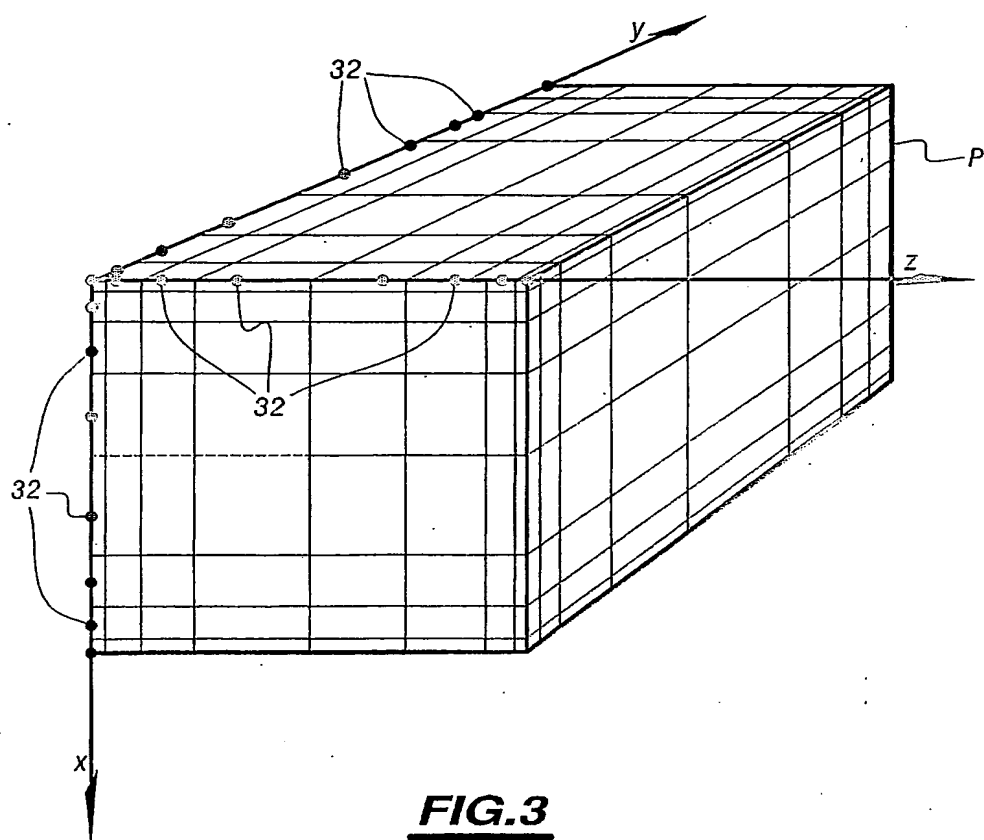


FIG.1

THIS PAGE BLANK (USPTO)

**FIG.2**

THIS PAGE BLANK (USPTO)



THIS PAGE BLANK (USPTO)

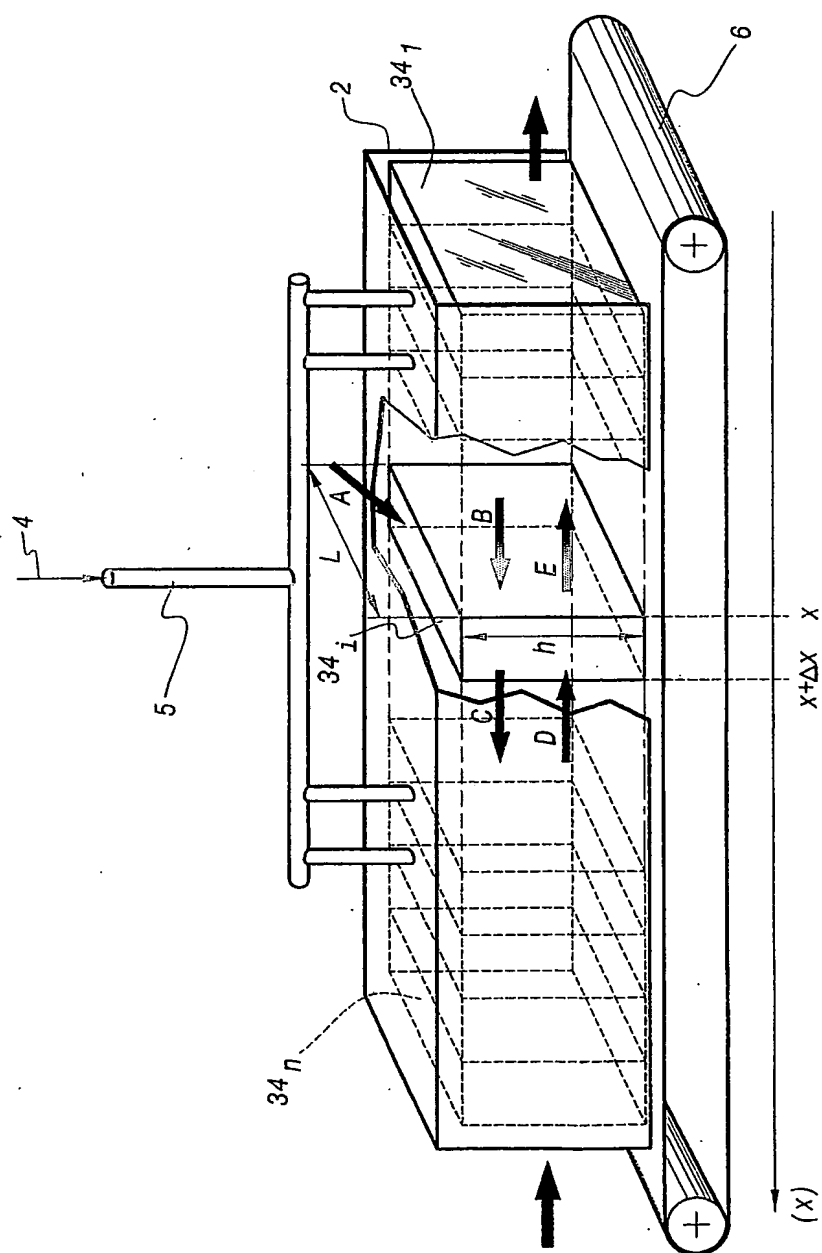
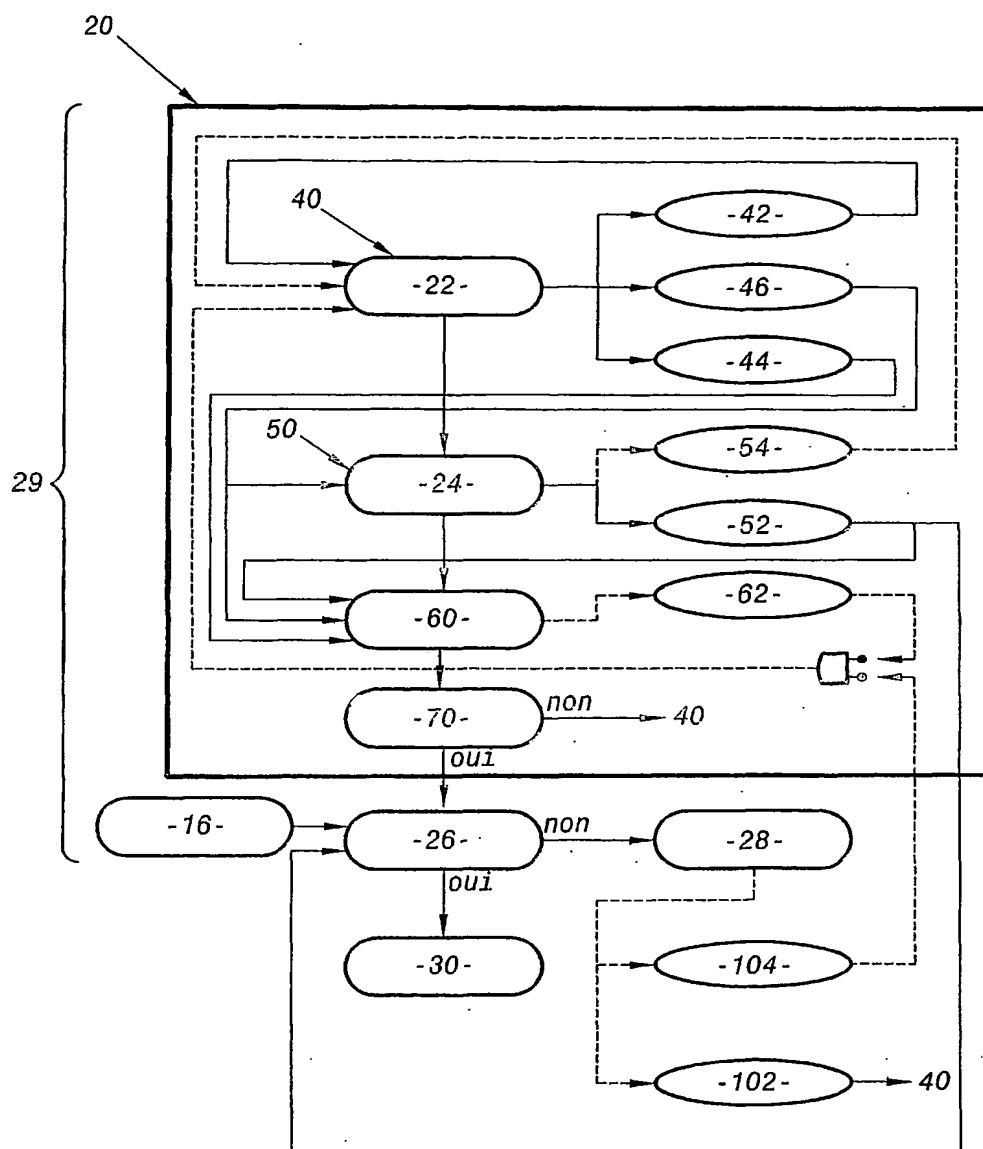


FIG. 4

THIS PAGE BLANK (USPTO)

**FIG.5**

THIS PAGE BLANK (USPTO)